

采用改进 Davidson-Cole 介电模型的变压器油纸绝缘状态分析

张涛¹, 李林多¹, 冉华军², 肖霞¹, 钟婷婷¹

(1. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 新能源微电网湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002)

摘要:为利用频域介电谱准确分析变压器油纸绝缘状态, 引入考虑直流电导率与跳跃电导率的改进 Davidson-Cole 介电模型。运用测量的频域介电谱数据参数化改进 Davidson-Cole 介电模型, 将其转化为非线性优化问题。选用混合蛙跳优化算法对改进 Davidson-Cole 介电模型参数进行辨识, 得到了弛豫时间 τ 、圆弧不对称度 β 和直流电导率 σ_{dc} 等特征参数。研究了老化与受潮对油纸绝缘试样的改进 Davidson-Cole 模型参数的影响特性, 结果表明 β 与糠醛含量、 σ_{dc} 与水分含量有着良好的指数关系; τ 与糠醛含量、水分含量有着良好的对数关系。通过线性拟合获得了糠醛含量、水分含量与模型参数的量化关系式, 其拟合优度较高, 因此可利用改进 Davidson-Cole 模型定量评估变压器油纸绝缘状态。

关键词: 变压器; 油纸绝缘; 改进 Davidson-Cole 模型; 水分含量; 糠醛含量; 频域介电谱

中图分类号: TM 41

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.01.028

0 引言

油浸式变压器在电力系统的运行中处于核心位置, 一旦发生故障将对电力系统的稳定运行造成巨大的损失^[1-3]。油纸绝缘作为油浸式变压器的主绝缘结构, 在运行过程中长期受到温度、水分、氧气、酸、电场、机械力等应力的作用而逐渐老化, 导致其机械性能和绝缘性能下降^[4-7]。研究表明, 绝缘纸的平均寿命会随含水量的增大而迅速减小, 热老化速率也将成倍增长^[8-11], 因此准确评估变压器的老化和受潮状态具有重要实用价值。国内学者指出绝缘油中的糠醛含量与反映绝缘纸老化程度的聚合度 (DP) 有较好的半对数关系, 可有效反映油纸绝缘老化状态, 但提取油样与纸样的过程繁琐, 不便于操作且易对绝缘结构造成损坏。频域介电谱 FDS (Frequency-domain Dielectric Spectroscopy) 作为一种新兴的介电响应诊断法, 其测量数据丰富, 不易受到现场环境的干扰, 测量频带窄且所需试验电压低, 更有利于变压器的现场诊断。现有研究表明 FDS 法所得的极化率、复介电常数以及介质损耗因素能不同程度地反映出变压器油纸绝缘结构的老化及受潮程度^[8], 其中提取与水分、老化相关的 FDS 特征参数已成为该领域的研究热点, 受到了广大学者的关注^[12-14]。

由电介质理论可知, 不同分子的极化行为可以采用不同的介电模型表征^[15-16]。经典 Debye 模型描述了偶极子在黏性介质中的极化过程, 但因其只满足于对单一弛豫现象的解释, 所以在现代电介质响应研究中衍生出了其经验修正模型, 例如 Cole-Cole

模型、Davidson-Cole 介电模型和 Havriliak-Negami 模型。考虑到利用 Cole-Cole 模型参数拟合的 FDS 曲线与实测曲线有较大的偏差^[1]; Havriliak-Negami 模型虽然普适性较强, 但在峰值区外时, 模型参数拟合出的 FDS 曲线精度偏低^[6]; 而 Davidson-Cole 介电模型考虑了弛豫时间的分布情况, 更精简地描述了介电弛豫过程, 且电导率与介电弛豫过程和油纸绝缘老化受潮状态紧密相关, 所以本文考虑绝缘油纸极化过程中直流电导与跳跃电导的影响, 提出了改进的 Davidson-Cole 介电模型, 制备了不同老化程度与受潮程度的绝缘油纸试样并进行了 FDS 谱线测量, 将测取的频率-复介电常数数据代入 Davidson-Cole 介电模型, 运用混合蛙跳算法进行参数辨识得到了不同含水量和不同老化程度下油纸绝缘的 Davidson-Cole 介电模型参量。在此基础上, 研究了受潮程度与老化程度对提取的模型特征参量的影响规律, 拟合得到了 Davidson-Cole 介电模型特征参数与水分含量 M_c 、糠醛含量 C_k 之间的定量关系式并进行了温度修正, 从而能够以 Davidson-Cole 介电模型特征参量为指标, 分析油纸绝缘的含水量与糠醛含量, 将提取的 Davidson-Cole 介电模型特征参量用于变压器受潮程度与老化状态的评估中。

1 改进 Davidson-Cole 介电模型与模型特征量

变压器运行时, 由于高低压绕组间电场的作用, 油纸绝缘内部沿电场方向产生感应偶极矩, 在油纸绝缘介质表面出现极化电荷, 称为极化现象, 而 Debye 模型及其模型参数能够很好地表征介电响应过程中的极化弛豫现象, 在对油纸绝缘介质的分析研究中起到了重要的作用。经典 Debye 模型公式为:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_{\text{hf}} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\text{hf}}}{1 + j\omega\tau} \quad (1)$$

收稿日期: 2018-01-05; 修回日期: 2018-11-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51307097)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51307097)

其中, ε^* 为材料的复介电常数,且 $\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$, ε' 和 ε'' 分别为 ε^* 的实部和虚部; ε_s 和 ε_{hf} 分别为稳态介电常数和光频介电常数; ω 为角频率; τ 为极化弛豫时间。

在式(1)的基础上,考虑弛豫时间的分布体系,引入圆弧不对称度^[6] $\beta \in (0, 1)$, 即:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_{hf} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{hf}}{(1 + j\omega\tau)^\beta} \quad (2)$$

式(2)为 Davidson-Cole 介电模型方程,但由于介电响应与电导响应现象在介质极化时均有发生,所以引入直流电导率 σ_{dc} 与跳跃电导率 σ_{ho} :

$$\sigma_{ho} = \xi / \varepsilon_0^n (j\omega) \quad (3)$$

则将式(2)写为:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_{hf} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{hf}}{(1 + j\omega\tau)^\beta} + \frac{\xi}{\varepsilon_0^n (j\omega)} + \frac{\sigma_{dc}}{j\omega\varepsilon_0} \quad (4)$$

其中, ξ 和 n 均为常数且 $0 < n < 1$, 这 2 个参数描述了跳跃电导过程,跳跃电导反映了电介质中存在的杂质与缺陷对材料绝缘介电特性的影响^[7]; ε_0 为真空介电常数, $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m。

式(4)即为本文改进的 Davidson-Cole 介电模型方程,其反映了油纸绝缘介质极化过程中的弛豫、直流电导、跳跃电导现象,将其变换为 ε^* 实部、虚部表达式为:

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_{hf} + \frac{\xi \cos(n\pi/2)}{\varepsilon_0 \omega^n} + \Delta\varepsilon \cos(\beta\theta) (\cos \theta)^\beta \quad (5)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{\sigma_{dc}}{\varepsilon_0 \omega} + \frac{\xi \sin(n\pi/2)}{\varepsilon_0 \omega^n} + \Delta\varepsilon \sin(\beta\theta) (\cos \theta)^\beta \quad (6)$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_s - \varepsilon_{hf} \quad (7)$$

$$\theta = \arctan(\omega\tau) \quad (8)$$

Davidson-Cole 介电模型是在 Debye 模型的基础上进行优化,引入电介质的极化参数与电导参数而建立的电介质模型。Davidson-Cole 介电模型的复平面曲线为一不规则的半圆(见图 1),式(2)中 β 反映了曲线偏离半圆的程度;Davidson-Cole 介电模型的参数可以很好地表征油纸绝缘介质的介电响应特性。根据文献^[7]的研究可知,在测试频段为 $10^{-4} \sim 10^4$ Hz 的范围内,可采用 Davidson-Cole 介电模型对油纸绝缘的内部极化弛豫过程进行分析。

将测得的绝缘油纸频域复介电常数值代入式(5)、(6),分别对复介电常数的实部与虚部进行拟合,可以得到相应的 7 个模型参数,如表 1 所示。

表 1 改进 Davidson-Cole 介电模型的参数

Table 1 Parameters of improved Davidson-Cole dielectric model

模型参数	描述对象	模型参数	描述对象
ε_{hf}	光频介电常数	ξ, n	跳跃电导
σ_{dc}	直流电导	$\Delta\varepsilon, \beta, \tau$	极化弛豫

随着油纸绝缘的老化与受潮,绝缘纸内部结构将发生改变,绝缘油中会出现老化产物,使 σ_{dc} 、 $\Delta\varepsilon$ 、 β 、 τ 等参数发生较大变化。因此,通过优化拟合得到相应各模型参数的值,分析模型参数与含水量及老化后油中糠醛含量之间的关系,对于油纸绝缘受潮程度的量化评估有重要的参考价值。

2 实验与 FDS 测量

实验仪器:IDAX-300 绝缘测试仪、三电极测试装置(见附录中图 A1)、HKF700 型水分测定仪、恒温老化箱、真空干燥箱、振荡器、LC-20A 型高效液相色谱仪、色谱分离柱。

实验材料:普通纤维素牛皮绝缘纸板(厚度为 0.5 mm)、25 号美力高矿物油、卡尔菲试剂、甲醇。

2.1 实验预处理

将绝缘纸板剪成直径为 130 mm 的圆片,重量约为 15 g,并将绝缘纸与脱气后的绝缘油分别置于恒温 110.0 °C/50 Pa 的干燥箱中真空干燥 72 h,通过高精度电子天平称重控制干燥后的绝缘纸微水含量小于 0.15%。

2.2 实验流程

a. 制取 4 组含水量不同的绝缘油纸试样。首先将预处理过的绝缘纸充分干燥,再暴露于空气中自然吸潮,通过设定不同的吸潮时间,并采用卡尔菲试剂与 HKF700 型水分测定仪测量得到含水量 M 。分别为 0.7%、1.3%、2.5%、3.7% 的 4 组试样,每组试样由 3 张绝缘纸叠合组成。然后将干燥脱气后的矿物油放入温度为 30 °C 的恒温箱中,将 4 组绝缘纸分别在恒温箱中真空浸油 48 h,最后使用 IDAX-300 绝缘测试仪对 4 组绝缘油纸试样进行 FDS 测量。

b. 制取 5 组老化程度不同的绝缘油纸试样。首先将预处理后的绝缘纸在恒温 110.0 °C/50 Pa 的干燥箱中充分干燥,取新绝缘油样进行干燥脱气处理,将绝缘纸试样置于三电极装置中密封,在常温下浸油 48 h。再将装有绝缘油纸试样的三电极装置放入老化箱中,抽真空至气压为 130 Pa,再充入足量的 N_2 ,使气压达到 0.1 MPa,在 130 °C 下进行加速热老化,老化箱的温度控制范围为 10~200 °C,温度分辨率为 ± 0.1 °C;分别在老化天数为 7、14、28、42、56 d 时取出 1 组绝缘油纸试样,并在室温下静置冷却 72 h。将绝缘油纸试样置于恒温箱中,恒温箱温度设置为 30 °C,误差范围为 ± 1.0 °C。使用 IDAX-300 绝缘测试仪对绝缘油纸试样进行 FDS 测量,测量频段取为

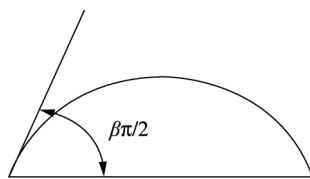


图 1 Davidson-Cole 介电模型复平面曲线

Fig.1 Complex plane curve of Davidson-Cole dielectric model

0.1 mHz~1 kHz,最后采用高效液相法测得 5 组老化绝缘油纸试样的油中糠醛含量 C_k 分别为 0.194、0.276、0.290、0.364、0.580 mg/L。

3 实验结果分析与参数辨识

3.1 实验结果处理与分析

在室温下,对 4 组含水量不同的绝缘油纸试样分别进行 3 次 FDS 测量,取测试所得 ε' 与 ε'' 平均值为对应频率下的测量结果,见图 2。不同老化程度的绝缘油纸试样在室温下的 FDS 测量结果见图 3。

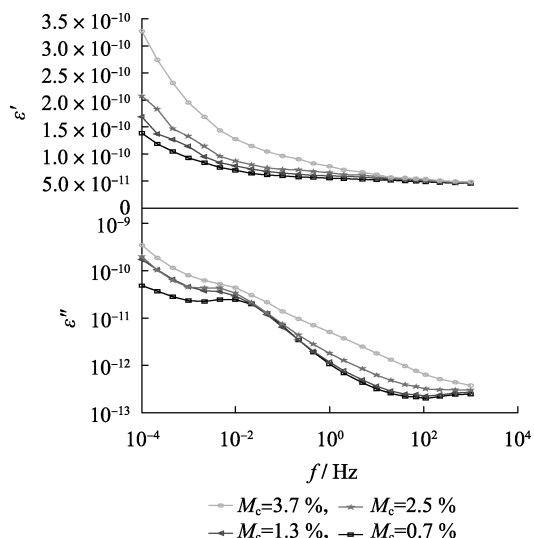


图 2 30 °C 下不同含水量的绝缘油纸试样的频域介电谱

Fig.2 FDS of oil paper samples with different moisture contents at 30 °C

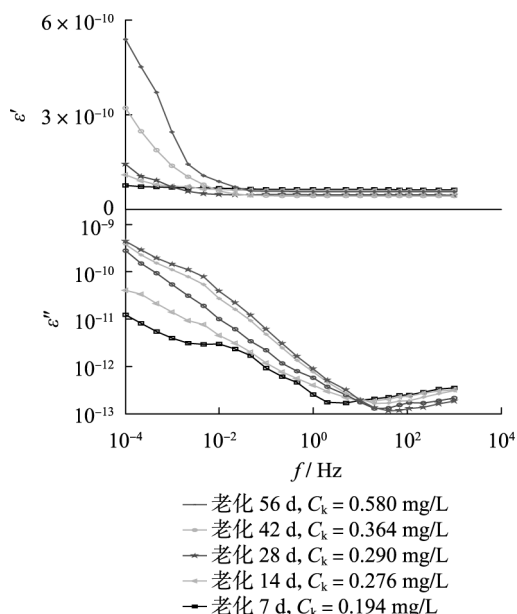


图 3 不同糠醛含量下绝缘油纸试样的频域介电谱

Fig.3 FDS of aging oil paper samples under different aging degrees

由图 2、3 可见,老化天数或含水量的上升均会引起复介电常数的实部与虚部增大,而含水量试样

的频域复介电常数 ε'' - f 曲线中出现了凸起部分,这是由于随着 M_c 的升高,电导损耗与极化损耗均相应增大,但实验中使用的油电导率偏高,致使电导损耗更突出从而出现了凸起。

3.2 Davidson-Cole 介电模型参数辨识

为了分析 Davidson-Cole 介电模型参数与绝缘状态之间的关系,本文将上述实验测量得到的 ε' - f 、 ε'' - f 数值代入式(5)、(6)中,采用最小二乘法进行数值拟合,拟合过程中要考虑复介电常数的实部、虚部 2 条曲线,参照文献[1]中的初值选取法根据 FDS 曲线设置模型参量初值。设定优化函数 $Q(\omega)$ 表示复介电常数的测量结果与拟合结果误差的平方和:

$$Q(\omega) = \left(\frac{\varepsilon' - \varepsilon'_m}{\varepsilon'} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon'' - \varepsilon''_m}{\varepsilon''} \right)^2 \quad (9)$$

其中, ε'_m 与 ε''_m 分别为复介电常数的实部与虚部测量值。设定参量范围为: $0 < \sigma_{dc} < 10^{-10}$, $3 < \varepsilon_{hf} < 5$, $0 < \beta < 1$ 。该模型为非线性优化问题,传统优化方法难以获得较优解,由于混合蛙跳算法结合了全局信息交换与局部深度搜索的优点,可以有效地避开局部极值点,本文采用混合蛙跳算法进行模型参数辨识,算法流程如图 4 所示。

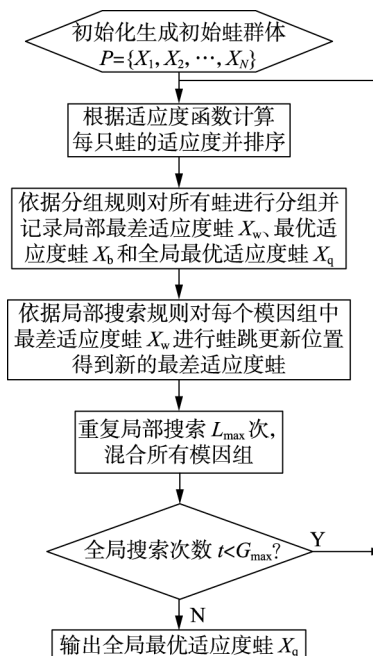


图 4 混合蛙跳算法流程图

Fig.4 Flowchart of shuffled frog leaping algorithm

3.3 油纸绝缘状态与 Davidson-Cole 介电模型参数的量化关系

根据图 4 所示的算法流程,本文对不同含水量及不同老化程度的多组试样的 Davidson-Cole 介电模型参数进行了辨识,并分析了含水量及老化程度与 Davidson-Cole 介电模型参数的量化关系。

3.3.1 含水量与 Davidson-Cole 介电模型参数的量化关系

表 2 给出了通过参数辨识获得的不同含水量下 Davidson-Cole 介电模型参数的值。由表 2 可见,随着水分含量 M_c 的增大,直流电导率 σ_{dc} 持续非线性增大,极化弛豫时间 τ 逐渐减小,圆弧不对称度 β 变化不明显,光频介电常数 ε_{hf} 及其他参数无明显递变规律。这是因为随着含水量的增大,油纸绝缘介质中的极性水分子增多,加快了直流电导过程,而跳跃电导过程受水分的影响很微弱,所以 σ_{dc} 增大而 ξ 与 n 的变化不明显。极性水分子的增多同时也促进了夹层极化,使极化过程更容易建立,从而导致极化弛豫时间 τ 变小。

表 2 不同含水量下的 Davidson-Cole 介电模型参数拟合值

Table 2 Fitting values of parameters of Davidson-Cole dielectric model under different water contents

参数	拟合值			
	$M_c = 0.7\%$	$M_c = 1.3\%$	$M_c = 2.5\%$	$M_c = 3.7\%$
$\sigma_{dc}/(S \cdot m^{-1})$	0.743	1.061	2.758	8.884
τ/s	2 671.4	1 198.2	241.7	51.2
$\xi/(S \cdot m^{-1})$	3.72	3.64	3.62	4.17
$\Delta\varepsilon/(F \cdot m^{-1})$	12.09	19.87	43.71	157.88
$\varepsilon_{hf}/(F \cdot m^{-1})$	4.24	4.58	4.32	4.46
β	0.632	0.629	0.615	0.615
n	0.12	0.13	0.07	0.11

因此本文选择 σ_{dc} 、 τ 作为评估 M_c 的特征参量,采用线性、次幂、指数或对数函数进行数据拟合,得到 M_c 与 σ_{dc} 、 τ 之间的函数关系式,如表 3 所示。

表 3 M_c 与 σ_{dc} 、 τ 的函数关系

Table 3 Function relationship between σ_{dc} , τ and M_c

评估量	拟合关系式	拟合优度
σ_{dc}	$\sigma_{dc} = 0.397 6e^{9.413M_c} + 0.148 6 e^{108.8M_c}$	0.996 5
	$\sigma_{dc} = 256.6M_c - 2.082$	0.870 6
	$\sigma_{dc} = 58 550M_c^{2.67}$	0.981 4
τ	$\lg \tau = 3.835 - 57.66M_c$	0.999 7
	$\tau = 6 802e^{-133.5M_c}$	0.988 1
	$\tau = 2 705 - 81 200M_c$	0.814 0

由表 3 可得如下结论。

a. 含水量 M_c 与 σ_{dc} 有着较好的指数关系,相对线性和次幂函数拟合具有更大的拟合优度,由于水分含量的增加会加速油纸绝缘老化,导致其直流电导率显著上升,呈非线性加速增大。通过对比几种拟合关系也可以看到,直流电导率随着水分含量的增加呈指数增加,具有良好的拟合优度。

b. 含水量 M_c 与 τ 有较好的对数关系,极化弛豫过程随着 M_c 的增加而加速,导致电导增大,电阻下降,弛豫时间为电阻与电容的乘积,因此极化弛豫时间显著降低,相较线性和次幂函数具有更大的拟合优度。

3.3.2 老化程度与 Davidson-Cole 介电模型参数的量化关系

表 4 给出了通过参数辨识获得的不同老化程度下 Davidson-Cole 介电模型参数的值。表 4 中, C_k 代表了不同的油纸绝缘的老化程度。

表 4 不同老化程度下 Davidson-Cole 介电模型参数拟合值

Table 4 Fitting values of Davidson-Cole dielectric model parameters under different aging degrees

参数	拟合值			
	$C_k = 0.194 \text{ mg/L}$	$C_k = 0.276 \text{ mg/L}$	$C_k = 0.290 \text{ mg/L}$	$C_k = 0.364 \text{ mg/L}$
$\sigma_{dc}/(S \cdot m^{-1})$	0.074	0.092	0.108	0.097
τ/s	844.7	799.6	793.3	764.3
$\xi/(S \cdot m^{-1})$	4.51	5.25	3.98	3.42
$\Delta\varepsilon/(F \cdot m^{-1})$	30.81	37.45	81.97	135.42
$\varepsilon_{hf}/(F \cdot m^{-1})$	4.20	4.97	4.31	4.83
β	0.597	0.609	0.618	0.637
n	0.24	0.18	0.32	0.08

由表 4 可见,随着老化程度的加深,油中糠醛含量 C_k 逐渐增大,圆弧不对称度 β 逐渐上升,直流电导率 σ_{dc} 先增大后减小,极化弛豫时间 τ 有递减趋势,其他参量均无规律性的改变。由于老化程度加深,绝缘纸不断裂解生成糠醛分散到绝缘油中,使介质损耗逐渐增大,所以复介电常数虚部与实部的比值相应增大,导致了 β 的递增。而糠醛杂质为极性分子,绝缘纸的裂解使其纤维素结构越来越松散,极性分子更容易嵌入纸中的空隙而加速了极化过程的发生,所以 τ 随之减小。除糠醛外,老化过程中还会生成水分,极性水分子的增多无疑会使 σ_{dc} 增大,但从表 4 中 σ_{dc} 的变化来看,老化程度的加深并不代表生成的水分越来越多,所以 σ_{dc} 并没有一直增大,故本文选择 τ 、 β 作为评估 C_k 的特征参量。采用线性、次幂、指数和对数函数进行数据拟合,得到 β 、 τ 与 C_k 之间的函数关系见表 5。

表 5 C_k 与 τ 、 β 的函数关系

Table 5 Function relationship between τ , β and C_k

评估量	拟合关系式	拟合优度
τ	$\tau = 635.1 - 294.2 \lg C_k$	0.979 6
	$\tau = 954.2e^{-0.593 7C_k}$	0.972 1
	$\tau = 933.8 - 474.5C_k$	0.968 6
β	$\beta = 1.458 - 0.909 3e^{-0.270 1C_k}$	0.954 1
	$\beta = 0.236 8C_k + 0.547 8$	0.941 7
	$\beta = 0.701 7C_k^{0.101 8}$	0.880 1

由表 5 可得如下结论。

a. 糠醛含量 C_k 和 τ 有较好的对数关系,相较线性和次幂函数具有更大的拟合优度,由拟合函数关系式可见,与水分含量增大导致弛豫时间降低的规律相似,随着糠醛含量的增大,老化程度加深,导致电阻降低,极化弛豫时间 τ 降低;由此可见, τ 既会受到绝缘中的水分含量的影响,也会受到绝缘老化

程度的影响,老化和受潮均会导致其值发生变化。

b. 圆弧不对称度 β 与糠醛含量 C_k 有着较好的指数关系,由拟合关系式可见,随着老化程度的加深,圆弧不对称度 β 逐渐上升,该特征量能有效表征绝缘老化的状态,可用于评估油纸绝缘的老化程度。

上述研究结果验证了改进 Davidson-Cole 介电模型参数对油纸绝缘受潮与老化程度评估的有效性,改进 Davidson-Cole 介电模型可用于评估油纸绝缘变压器的老化和受潮程度。

4 测量温度影响的修正

考虑到温度改变会影响油纸绝缘的老化过程并对 FDS 测量结果造成较大影响,在制备含水量试样的过程中取 $M_c = 0.5\%$ 的绝缘纸分为 5 份,每份试样取 3 层纸叠合后放置在三电极测试装置的铜极板间压紧,并浸入干燥后的新油里 24 h。待绝缘纸充分浸油后,将 5 组三电极测试装置分别放入恒温箱中,在温度为 30~70 °C 时进行 FDS 测试,测试结果如图 5 所示。

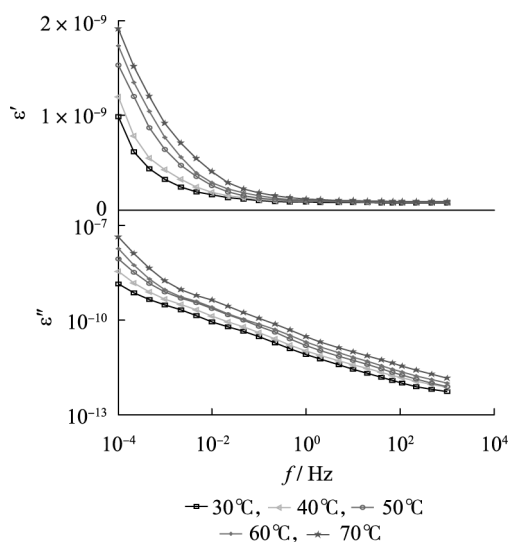


图 5 $M_c = 0.5\%$ 时,不同温度下油纸绝缘的 FDS

Fig.5 FDS of oil paper insulation at different temperatures when $M_c = 0.5\%$

由图 5 可见,温度升高使复介电常数的实部、虚部值均变大,因而在对变压器油纸绝缘进行 FDS 测量及拟合评测时需要考虑测试温度的影响。本文均是在 30 °C 下对含水量绝缘油纸试样及老化绝缘油纸试样进行 FDS 测量的,因此,根据文献[15]将本文试验温度 T 与变压器实测温度 T_s 代入 Arrhenius 方程:

$$\alpha_T = \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (10)$$

其中, R 为玻耳兹曼常数, E_a 为活化能,它们只随材料特性改变而变化,因此可以通过 IDAX-300 绝缘

测试仪得到 E_a 与 R 的值,再将实测温度与试验温度代入式(10)即可得到 α_T 。根据图 5 数据进行拟合得到实测温度 T_s 与 α_T 的关系式如式(11)所示,其拟合优度为 0.996 8。

$$\alpha_T = 0.1178 \exp(0.0702 T_s - 0.0104) \quad (11)$$

α_T 与频温平移^[17]前后测试点频率的关系如式(12)所示。

$$\alpha_T = f_{T_s} / f_{30} \quad (12)$$

其中, f_{T_s} 为实测温度 T_s 下测得的 $\varepsilon' - f$ 、 $\varepsilon'' - f$ 曲线中的 1 个测试点对应的频率, f_{30} 为 $\varepsilon' - f$ 、 $\varepsilon'' - f$ 曲线平移后该测试点归算至试验温度 30 °C 时对应的频率。根据 α_T 与式(12),将实测 FDS 曲线作相应平移后,得到归算至试验温度 T 下的实测 FDS 曲线,可消除试验温度对 FDS 测量结果的影响,然后通过参数拟合评估变压器的受潮与老化程度,可提高评估结果的准确性。

5 结论

a. 本文引入直流电导与跳跃电导,提出了改进 Davidson-Cole 介电模型,通过混合蛙跳算法,将不同老化与受潮状态下的绝缘油纸样品的实测 FDS 数据代入改进 Davidson-Cole 介电模型的 ε^* 的实、虚部解析式中进行参数辨识,拟合得到 7 个 Davidson-Cole 介电模型参数。分析研究参量随绝缘油纸受潮程度与老化程度的变化规律发现, M_c 的增大会使得 σ_{dc} 增大、 τ 减小; C_k 的增大会使得 τ 减小、 β 增大,其他参数则没有明显的递变关系。

b. 选取 β 、 σ_{dc} 和 τ 作为评估油纸绝缘 M_c 与 C_k 的特征参量,拟合得到了两者的线性关系式,结果表明 β 与 C_k 、 σ_{dc} 与 M_c 均有着良好的指数关系; τ 与 C_k 、 M_c 有着良好的对数关系,验证了改进 Davidson-Cole 介电模型参数 β 、 σ_{dc} 与 τ 对油纸绝缘受潮及老化程度评估的有效性。

c. 引入频温平移法与平移因子对 FDS 测量结果进行温度修正,消除了不同试验温度对评估结果的影响,提高了现场变压器油纸绝缘的受潮程度与老化程度量化评估的可靠性。

d. 由于老化过程比较复杂,除了生成糠醛、酸等杂质还会产生水分,因此在对糠醛含量进行评估时还要区分老化与水分一起对频域谱及相应拟合参数的影响,笔者后续将对其进行实验探究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 杨丽君,齐超亮,邓帮飞,等. 采用修正 Cole-Cole 模型提取油纸绝缘频域介电谱的特征参量方法[J]. 高电压技术,2013,39(2):310-317.

- YANG Lijun, QI Chaoliang, DENG Bangfei, et al. Application of modified Cole-Cole model to extract characteristics of frequency dielectric spectroscopy of oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 310-317.
- [2] SETAYESHMEHR A, FOFANA I, EICHLER C, et al. Dielectric spectroscopic measurements on transformer oil-paper insulation under controlled laboratory conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(4): 1100-1111.
- [3] 黎成林, 曹保江, 孙健翔, 等. 基于 FDS 的变压器油浸纸老化程度与水分含量评估方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 217-223.
- LI Chenglin, CAO Baojiang, SUN Jianxiang, et al. FDS-based assessment of aging degree and moisture content for oil-paper in transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 217-223.
- [4] 陈伟根, 杜杰, 凌云, 等. 变压器油纸绝缘气隙放电能量-小波矩特征及放电过程划分[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 89-95.
- CHEN Weigen, DU Jie, LING Yun, et al. Energy-wavelet moment characteristics of air-gap discharge in oil-paper insulation of transformer and partition of discharge process[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 84-95.
- [5] LINHJELL D, LUNDGAARD L, GAFVERT U. Dielectric response of mineral oil impregnated cellulose and the impact of aging[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(1): 156-169.
- [6] 刘骥, 尹梦涵, 李秀娟, 等. 油纸绝缘老化评估的 Davidson-Cole 模型参数提取方法[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(3): 63-70.
- LIU Ji, YIN Menghan, LI Xiujing, et al. Parameters extraction of Davidson-Cole model on aging assessment of oil-paper insulation[J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(3): 63-70.
- [7] 董明, 刘媛, 任明, 等. 水分含量与分布对油纸绝缘频域介电谱影响的有限元仿真与研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3403-3410.
- DONG Ming, LIU Yuan, REN Ming, et al. Impacts of Moisture content and distribution on frequency domain spectroscopy of oil-paper insulation system by FEM approach[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3403-3410.
- [8] FOFANA I, WASSERBERG V, BORSI H, et al. Challenge of mixed insulating liquids for use in high-voltage transformers[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(4): 5-16.
- [9] 周利军, 李先浪, 王晓剑, 等. 基于回复电压曲线的油纸绝缘状态评估[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 489-496.
- ZHOU Lijun, LI Xianlang, WANG Xiaojian, et al. Status assessment of oil-paper insulation based on recovery voltage method[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 489-496.
- [10] 杨丽君, 邓帮飞, 廖瑞金, 等. 应用时-温-水分叠加方法改进油纸绝缘热老化寿命模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 196-203.
- YANG Lijun, DENG Bangfei, LIAO Ruijin, et al. Improvement of lifetime model on thermal aging of oil-paper insulation by time-temperature-moisture superposition method[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 196-203.
- [11] 闰春江. 油浸电力变压器固体绝缘老化的诊断及其应用[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.
- RUN Chunjiang. Diagnosis and its application of immersed power transformers solid insulation aging[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2003.
- [12] 林元棣, 廖瑞金, 张懿议, 等. 换油对变压器油中糠醛含量和绝缘纸老化评估的影响及修正[J]. 电工技术学报, 2017, 32(13): 255-263.
- LIN Yuangeng, LIAO Ruijin, ZHANG Yiyi, et al. Effects and corrections of oil replacement upon furfural content in insulating oil and aging assessment of insulation paper of power transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(13): 255-263.
- [13] PAHLAVANPOUR P, EKLUND, MARTINS M A. Insulating paper ageing and furfural formation[C]//Proceedings of 2003 Electrical Insulation and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference. Indianapolis, India; IEEE, 2003: 283-288.
- [14] FARAHANI M, BORSI H, GOCKENBACH E. Dielectric response studies on insulating system of high voltage rotating machines[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(1): 383-393.
- [15] SAHA T K, PURKAIT P. Investigation of an expert system for the condition assessment of transformer insulation based on dielectric response measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1127-1134.
- [16] 廖瑞金, 杨丽君, 郑含博, 等. 电力变压器油纸绝缘热老化研究综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 1-12.
- LIAO Ruijin, YANG Lijun, ZHENG Hanbo, et al. Reviews on oil-paper insulation thermal aging in power transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 1-12.
- [17] SAHA T K, PURKAIT P. Investigation of an expert system for the condition assessment of transformer insulation based on dielectric response measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1127-1134.

作者简介:



张涛

张涛(1981—),男,安徽阜阳人,副教授,博士,通信作者,研究方向为电力系统优化运行、高电压绝缘及测试技术、电力系统过电压与接地技术(E-mail: unifzhang@hotmail.com);

李林多(1994—),男,湖北武汉人,硕士研究生,主要研究方向为高电压绝缘及测试技术(E-mail: 13618697813@163.com)。

(下转第 204 页 continued on page 204)

- [22] REN L K, LV W M, JIANG S W, et al. Fault diagnosis using a joint model based on sparse representation and SVM[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65 (10): 2313-2320.

作者简介:

杨秋玉(1986—),男,福建仙游人,博士研究生,主要研究方向为电气设备在线监测与故障诊断、高电压与绝缘技术(E-mail: qiuqiyang_1025@163.com);

阮江军(1968—),男,浙江绍兴人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电磁场工程应用、电磁兼容和高电压与

绝缘技术(E-mail: ruan308@126.com);



杨秋玉

黄道春(1976—),男,黑龙江齐齐哈尔人,副教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为输变电设备外绝缘、高压电器、电磁场数值计算及其工程应用(E-mail: huangdc99@163.com);

庄志坚(1986—),男,福建厦门人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电气设备在线监测与故障诊断、新一代同步选相开关(E-mail: zhijian.zhuang@cn.abb.com)。

Over-travel detection of electrical contact for high-voltage circuit breaker based on improved HHT and SVM

YANG Qiuyu¹, RUAN Jiangjun¹, HUANG Daochun¹, ZHUANG Zhijian²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Power Product Medium Voltage Technology Center, ABB(China) Co., Ltd., Xiamen 361006, China)

Abstract: The HHT(Hilbert-Huang Transform) is improved by EEMD(Ensemble Empirical Mode Decomposition). The improved HHT method combined with SVM(Support Vector Machine) is applied to feature extraction of vibration signal of HVCB(High-Voltage Circuit Breaker) and over-travel state recognition of HVCB's electrical contacts. The IMF(Intrinsic Mode Function) components reflecting local characteristics of HVCB's vibration signal are extracted by EEMD, then their Hilbert marginal spectrum energy is calculated to build characteristic vector of electrical contact over-travel of HVCB. The SVM is trained by the characteristic vector to realize the automatic detection of electrical contact over-travel. The vibration signals of HVCB under different over-travel states are extracted and analyzed, and the results show that the proposed method can effectively detect the electrical contact over-travel of HVCB.

Key words: high-voltage circuit breaker; vibration signal; over-travel of electrical contacts; Hilbert-Huang transform; support vector machine; state recognition

(上接第197页 continued from page 197)

Analysis of transformer oil paper insulation aging using improved Davidson-Cole dielectric model

ZHANG Tao¹, LI Linduo¹, RAN Huajun², XIAO Xia¹, ZHONG Tingting¹

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: In order to accurately analyze the state of transformer oil paper insulation using FDS(Frequency-domain Dielectric Spectroscopy), an improved Davidson-Cole dielectric model considering DC conductivity and hopping conductivity is proposed. The Davidson-Cole dielectric model is improved by parameterizing the measured FDS data and then transformed into a nonlinear optimization problem. The mixed frog leaping optimization algorithm is adopted to identify the parameters of the improved Davidson-Cole dielectric model, by which, the characteristic parameters such as relaxation time τ , asymmetry of circular arc β and DC conductivity σ_{dc} are obtained. The influences of aging and moisture on the parameters of modified Davidson-Cole dielectric model for oil paper insulation samples are researched. The research results show that β has good exponential relationship with furfural content, σ_{dc} has good exponential relationship with moisture content, and τ has good logarithmic relationship with furfural content and moisture content. Quantitative functions of relationship between furfural content, moisture content and model parameters are obtained by linear fitting. These quantitative functions have high goodness of fit, so the improved Davidson-Cole dielectric model can be used to quantitatively evaluate the state of transformer oil paper insulation.

Key words: power transformers; oil-paper insulation; improved Davidson-Cole model; water content; furfural content; frequency-domain dielectric spectroscopy

附录

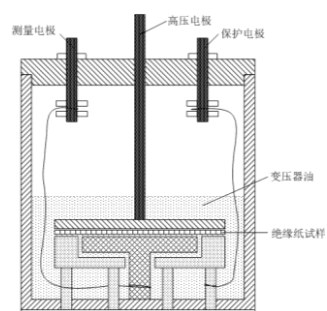


图 A1 三电极测试装置

Fig.A1 Three electrode test device